

100mWキンクフリー、低アスペクト比青紫色半導体レーザ

100mW Kink-free Blue-violet Laser Diodes with Low Aspect Ratio

水野 崇, 浅野 竹春, 東條 剛, 喜嶋 悟, 竹谷 元伸, 日野 智公, 渋谷 勝哉,
藤本 強, 大藤 良夫, 矢吹 義文, 内田 史朗, 池田 昌夫

T. Mizuno, T. Asano, T. Tojyo, S. Kijima, M. Takaya, T. Hino, K. Shibuya,
T. Fujimoto, Y. Ohfuji, Y. Yabuki, S. Uchida and M. Ikeda

ソニー白石セミコンダクタ株式会社 開発センター
Development Center, Sony Shiroishi Semiconductor Inc.

We realized GaN-based blue-violet laser diodes with a kink-free output power over 100mW and an aspect ratio down to 2.3. A new ridge structure was introduced to realize a high kink level at a wide beam divergence angle parallel to the junction plane. A new laser structure around the active layer was effective to obtain narrow beam divergence angle perpendicular to the junction plane, keeping low the threshold current.

1. はじめに

現在、我々は、次世代光ディスク用光源として期待される、400～410nm帯域に発振波長を持つ高出力半導体レーザの開発を進めている。近年、GaN系材料を用いた青紫色半導体レーザの諸特性は急速に発展しており、我々も横方向成長技術の導入等により、60°C、30mW動作時のMTTFが15000時間を超えるレーザ素子の作製が可能となっている⁽¹⁾。

本論文では、従来不可能であった高キンクレベルと低アスペクト比の両立を、世界で初めて実現させた新規構造について報告する。

一般的に、半導体レーザを、より光ディスク用光源に適したものとするには、放射角のアスペクト比低減が望まれる。アスペクト比を低減させるためには、水平放射角を拡大し、垂直放射角を低減させなければならない。

水平放射角を増大させるためには、リッジ内外の屈折率差を大きく設計する必要がある。だが、屈折率差を大きくすることは、1次横モード発振による横モードの不安定化を招き、キンクレベルが低下してしまうことが多い。また、垂直放射角を低減させるには、ガイド層膜厚を薄くし、活性層への光閉じ込めを弱くしなければならない。しかしながら、光の閉じ込めを弱くすることで、閾値電流の増大を引き起こす可能性もある。そのため、従来、我々が採用していた構造では、光出力100mW以上の高いキンクレベルと低アスペクト比の両立は困難であった。

そこで、今回、我々は、リッジ側面を光吸収層で埋め込む新規構造の採用とリッジ幅を最適化する事で、高いキンクレベルを保持しつつ水平放射角の拡大を図った。さらに、縦構造にも新規構造を採用す

ることで、垂直放射角低減時に問題となる閾値電流の増大を抑制した。

その結果、100mWキンクフリー、かつ、低アスペクト比2.3を有するレーザ素子を、世界で初めて作製することに成功した。

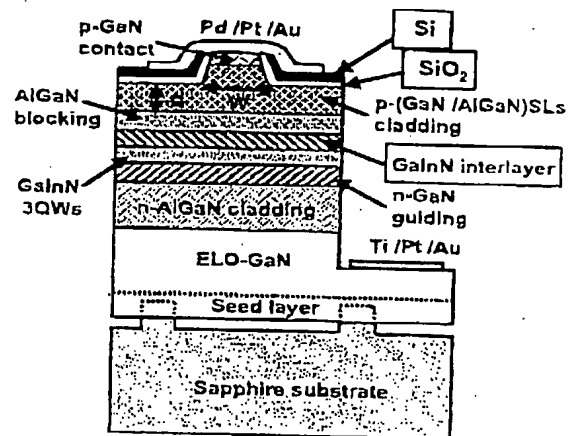


Fig.1 Schematic diagram of laser diode

2. レーザ構造

Fig.1に、レーザ構造の概略図を示す。本研究におけるレーザ素子の結晶成長は、MOCVD法により3インチのサファイア基板上行なった。

初めに、サファイア基板上に、GaNバッファ層を介しGaN層を成長する。次いで、このGaN層上にSiO₂を成膜、パターニングし、13.5 μm幅の窓部を形成する。その後、RIEによりサファイア基板までエッチングを行ない2.5 μm幅のGaN種結晶を作製する。種結晶上のSiO₂を除去した後、再度MOCVD法によ

り、種結晶からELO (Epitaxial Lateral Overgrowth)を行ない、n-GaN層を形成する。このELOは、結晶の横方向成長を利用し、周期的に低欠陥密度領域を形成する結晶成長技術である。我々も、ELOの採用により、横方向成長部の欠陥密度が 10^6 cm^{-2} の良質な結晶の作製が可能^[2]となり、 60°C 、30mW動作時においてもMTTFが15000時間を超えるレーザ素子を実現した。そのエージング特性を、Fig.2に示す。このとき、寿命の定義は、初期動作電流値から20%上昇する時間とした。

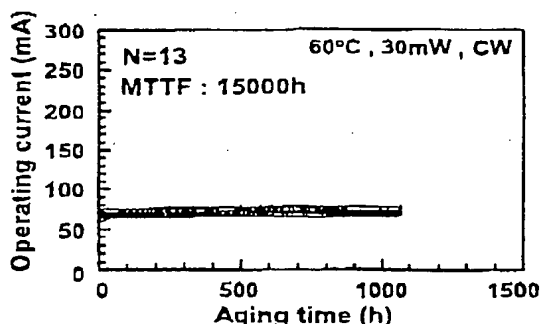


Fig.2 Aging curve of LDs on ELO-GaN

ELOにより低欠陥密度領域を有するn-GaNを作製した後、そのn-GaN上に、 $n\text{-Al}_{0.085}\text{Ga}_{0.915}\text{N}$ クラッド層、n-GaNガイド層、3ベアのGaInN多重量子井戸活性層、 $p\text{-Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 電子障壁層、p-GaNガイド層、 $p\text{-GaIn}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ 超格子クラッド層、p-GaNコンタクト層を連続的に結晶成長する。

ただし、本論文で報告するレーザ素子は、低アスペクト比実現のため、Fig.1に示す様に、p型クラッド層をAlGaIn電子障壁層に隣接させ、活性層とAlGaIn電子障壁層の間にGaInN中間層を導入している。n型、p型のドーパントには、それぞれ、Si、Mgを用いている。

リッジ型ストライプは、低欠陥領域である横方向成長部上にRIEを用いて形成した。また、横モードの安定化を図るために、リッジ両脇は、 SiO_2 および、その上にSiを成膜した二層構造の絶縁膜で埋め込んでいる。

p電極にはPd/Pt/Auを、n電極にはTi/Pt/Auを採用している。

レーザ端面は、ヘキソにより形成し、フロント端面には反射率10%、リア端面には反射率95%の反射膜が成膜されている。レーザ共振器長は $600 \mu\text{m}$ とした。

3. 横モード制御

水平放射角を拡大するためには、Fig.1に示しているdの厚さを薄くし、リッジ内外の屈折率差(Δn)を

大きくする必要がある。しかし、 Δn を大きくすると、1次横モードの発振も助長してしまう。そのため、0次モードと1次モードが混在し、横モードの不安定化を招き、キンクレベルの低下が生じる。

Fig.3に、リッジ側面を膜厚200nmの SiO_2 単層で埋め込んだ従来構造における、 Δn とキンクレベル、および、 Δn と水平放射角($\theta //$)の関係を示す。Fig.3より、 Δn を大きくすることで、水平放射角は拡大するが、キンクレベルは低下することがわかる。さらに、実用上必要とされる、水平放射角 8.0° 以上と50mW以上のキンクレベルを両立するために必要な Δn の領域幅(図中、灰色部)が、 5×10^{-4} と非常に狭いことも分かる。

この Δn の領域を実現するためには、dの厚さを $\pm 5 \text{ nm}$ の精度で制御しなければならない。したがって、従来の SiO_2 単層構造では、成長膜厚の均一性、リッジ脇のエッチング深さの制御性を極めて高く保たなければ、均一な特性のレーザ素子の作製は困難であり、量産には不向きであった。

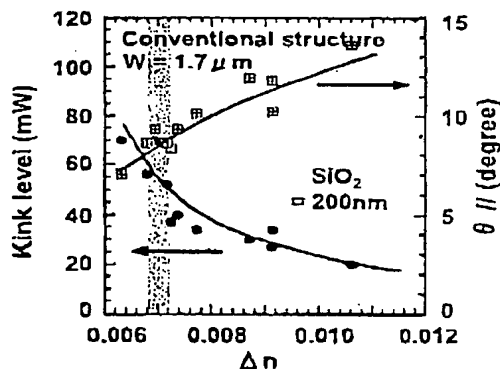


Fig.3 Kink level, $\theta //$ v.s. Δn in conventional structure

そこで、今回、我々は、400nm帯の光に対する吸収係数が高いSiを、リッジ側面の埋め込み層に採用した。従来、膜厚が200nmの SiO_2 単層であったリッジ側面埋め込み層を、Fig.1の様に SiO_2/Si の積層二層構造とすることで、キンク発生の原因となる1次モードを選択的に吸収させ、横モードの安定化を図った^[3]。これにより、高いキンクレベルを保持しながら水平放射角の拡大を試みている。

Fig.4に、計算により求めた、 SiO_2/Si 埋め込み層の SiO_2 膜厚に対する、0次モードと1次モードの吸収係数の依存性を示す。このとき、Si膜厚は40nmと一定に保ち、光吸収の無い SiO_2 膜厚を変えることで、Si層による光吸収を調節した。Fig.4より、 SiO_2 膜厚を薄くする程、吸収係数が増大し、さらに、0次モードと1次モードの吸収係数の差も大きくなることがわかる。今回、我々は、0次モードの吸収損失を極力抑

又、かつ、1次モードを吸収させるため、Si層とSiO₂層の膜厚を、それぞれ、40nm、50nmに設定し、積層二層構造を作製した。

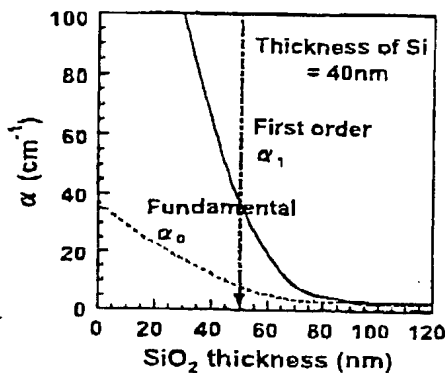


Fig.4 Absorption loss (α) v.s thickness of SiO₂

Fig.5に、リッジ側面をSiO₂/Si二層構造とした場合の、 Δn とキンクレベル、ならびに、 Δn と水平放射角の関係を示す。Fig.5より、水平放射角8.0°以上と50mW以上のキンクレベルを両立させる Δn の領域(図中、灰色部)が 3×10^{-3} と広がっていることがわかる。これに伴い、 Δn を制御するためのd膜厚のマージンも ± 15 nmと拡大し、均一な特性を有するレーザ素子の安定した作製が可能となった。

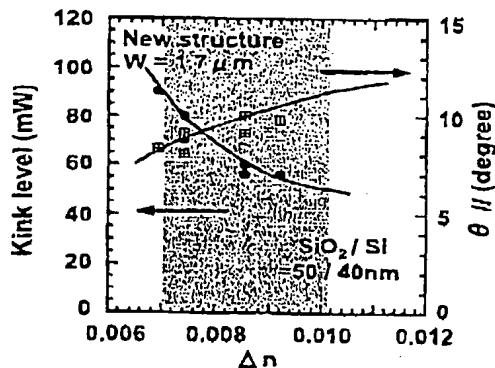


Fig.5 Kink level, $\theta //$ v.s Δn in new structure

また、我々は、従来1.7 μ mであったリッジ幅を、1.5 μ mまで狭ストライプ化し、1次モードのリッジ外へのしみ出しを大きくすることで、さらなる1次モード発振の抑制を図った。

この新規リッジ構造(SiO₂/Si埋め込み層、狭ストライプ)の採用によって得られた、キンクレベルと水平放射角の関係をFig.6に示す。従来のSiO₂単層構造に比べ、SiO₂/Si二層構造を導入することで、20mW程度キンクレベルが向上し、さらに、リッジ幅(W)を1.5 μ mまで狭ストライプ化することで、50mW程度向

上していることが分かる。即ち、新規リッジ構造を採用することで、9.0°の水平放射角と100mWのキンクレベルの両立が可能となった。

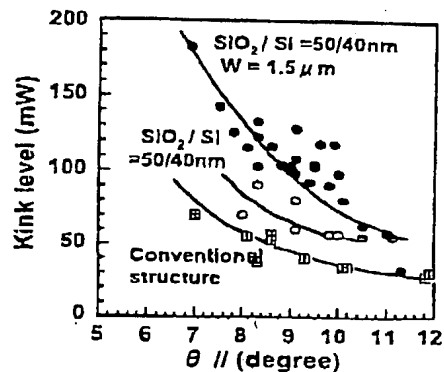


Fig.6 $\theta //$ dependence of kink level

4. 垂直放射角低減

垂直放射角を低減するためには、ガイド層の膜厚を薄くし、活性層への光の閉じ込めを弱くすることが有効である。ただし、ガイド層を薄くし過ぎる、即ち、光の閉じ込めを弱くし過ぎると、レーザ発振するのに必要な利得が小さくなってしまいうために、誘導放出の効率が低下し、閾値電流が増大してしまう可能性がある。

また、GaN系材料を用いた青紫色半導体レーザには、活性層からの電子のオーバーフローを抑制するために、AlGaN電子障壁層を活性層近くに設けなければならないという特徴がある。しかし、このAlGaN電子障壁層が活性層に近接し過ぎると、格子不整合による歪みの影響が活性層に生じ発光効率が低下してしまう。これを防ぐためには、活性層とAlGaN電子障壁層の間にGaInN中間層を挿入し、AlGaN電子障壁層を活性層から離すことが有効であると、我々は見出し、既に報告している[9]。

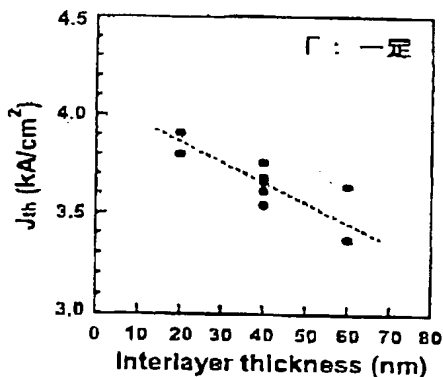


Fig.7 J_{th} v.s GaInN interlayer thickness

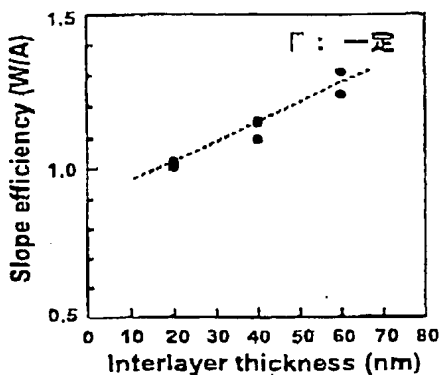


Fig.8 Slope efficiency v.s interlayer thickness

Fig.7には、GaInN中間層膜厚と閾値電流密度(Jth)の関係を、また、Fig.8にはGaInN中間層膜厚とスロープ効率(SE)の関係を示した。このとき、活性層への光の閉じ込めは常に一定になる様に設計した。プロットは実験値である。この結果より、GaInN中間層の膜厚を厚くすることで閾値電流密度が低下し、スロープ効率が向上していることがわかる。即ち、GaInN中間層の導入により発光効率が向上していることがわかる。

この様な背景から、閾値電流を増大させずに垂直放射角を低減させるためには、AlGaIn電子障壁層による歪みが活性層に与える影響を緩和させる目的で、活性層とAlGaIn電子障壁層の間にGaInN中間層を挿入し、さらに、十分な誘導放出を得られる適切なガイド層膜厚を設定するという二点に留意してレーザ構造を設計しなければならない。

我々は、これらの問題を解決するため、Fig.9に示す様な従来の縦構造^[4]に替えて、新規縦構造を採用した。

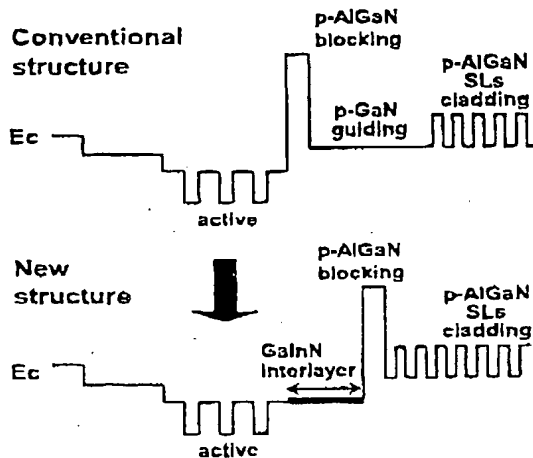


Fig.9 Schematic diagram of conduction band

この新規縦構造は、活性層とAlGaIn電子障壁層の間に、歪みの影響を緩和させるためにGaInN中間層を導入し、かつ、そのGaInN中間層を、光閉じ込めを変化させる効果を持つガイド層として採用している点に特徴がある。

Fig.10には、実験により求めた、ガイド層膜厚と垂直放射角($\theta \perp$)、および、ガイド層膜厚と閾値電流密度(Jth)の関係を示してある。このときのガイド層膜厚は、p-GaNガイド層膜厚とGaInN中間層膜厚を合わせた膜厚である。

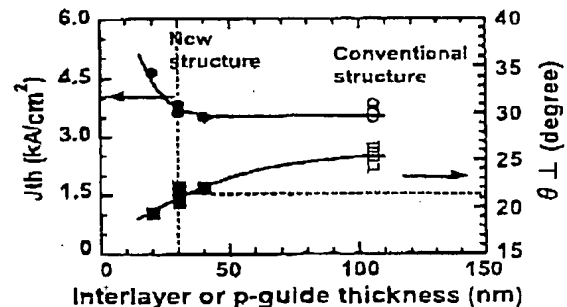


Fig.10 Jth, $\theta \perp$ v.s guide thickness

Fig.10に示した結果より、ガイド層膜厚を変化させ垂直放射角を低減させる場合、閾値電流を増大させないためにはガイド層膜厚を30nm以上としなければならないことがわかる。また、Fig.7、Fig.8に示した様に、活性層におよぶ歪みの影響を緩和させ、発光効率の低下を防ぐためには、GaInN中間層膜厚を可能な限り厚くした方が効果的であることもわかっていて。この二点を考慮し、最も垂直放射角を低減できる最適な縦構造として、我々は、GaInN中間層を30nmと設定し、p型クラッド層をAlGaIn電子障壁層に隣接させる構造を採用した。

この設定値でレーザ素子を作製したところ、発光効率の低下、閾値電流の増大を抑制し、さらに、従来構造では25°であった垂直放射角を、21°~22°まで低減することが可能となった。

5. レーザ特性

今回得られた結果をもとに作製したレーザの諸特性を示す。新規リッジ構造採用による水平放射角の拡大、ならびに、新規縦構造の導入による垂直放射角の低減により、従来、2.8だった放射角のアスペクト比を、Fig.11に示す様に、2.3にまで低減することが可能となった。このとき、Fig.12に示す様に、100mWまでの光出力がキンクフリーで得られてお

り、今回採用したリッジ側面の積層二層構造、ならびに、狭ストライプによる横モード制御の効果が顕著に現われている。

また、Fig.13の電圧電流特性(V-I特性)に示されている様に、狭ストライプ化により懸念される電圧上昇は少なく、閾値電圧は4.3Vの値を示し、室温連続動作、出力30mW時の動作電圧も5.0Vを下回っている。さらに、活性層への光閉じ込めを弱くし、垂直放射角を低減したにもかかわらず、閾値電流31.5mA、閾値電流密度3.5KA/cm²という値を示し、低閾値が実現できている。これは、GaInN中間層の導入、ならびに、適切なガイド層膜厚設計という新規縦構造による効果だと言える。

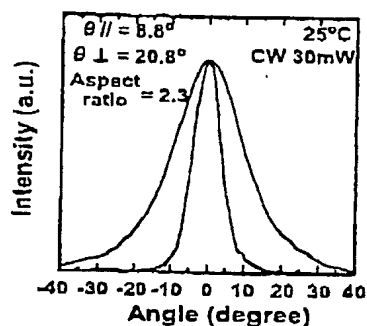


Fig.11 Far-field patterns at 30mW

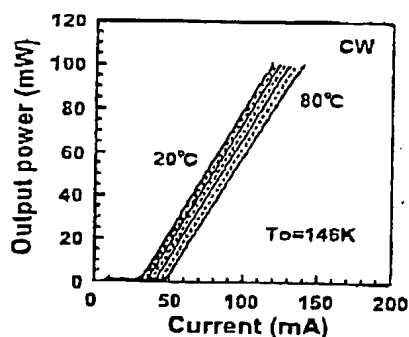


Fig.12 Temperature dependence of L-I characteristics

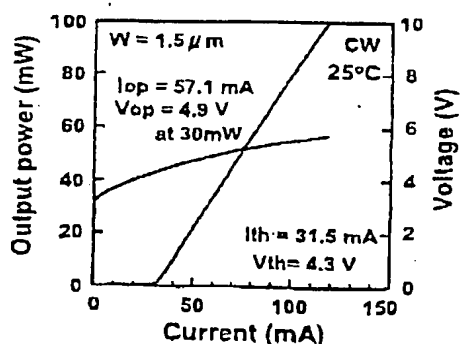


Fig.13 Typical L-I and V-I characteristics

これらの結果からもわかる様に、今回、我々が採用した新規構造を、レーザ素子に導入することで100mWキックフリーとアスペクト比2.3の両立が可能となった。

Fig.14は、新規構造を用いて作製した低アスペクト比レーザ素子のエージング特性を表している。エージング試験条件は、60°C、30mW、連続発振である。動作時間は1000時間を経過し、現在も安定した動作を継続している。

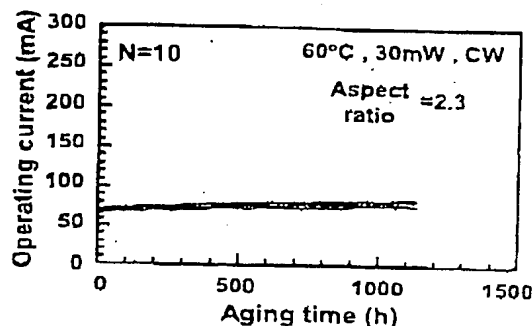


Fig.14 Aging curves of LDs with low aspect ratio

次に、相対雑音強度(RIN)特性について述べる。Fig.15には、高周波重畳有無によるRINの変化を示しており、Fig.16には、戻り光量によるRINの変化を示している。このときの高周波重畳条件は、バイアス電圧3V、周波数500MHzである。

Fig.15に示す様に、光出力2.5mWにおけるRINの値は-128dB/Hz、高周波重畳時には-130dB/Hzという値を示している。

また、一般的に、戻り光量を増加させることでRINの悪化が懸念されるが、Fig.16に示す様に、戻り光量を5%とした場合でも、-125dB/Hz以下のRINが得られている。

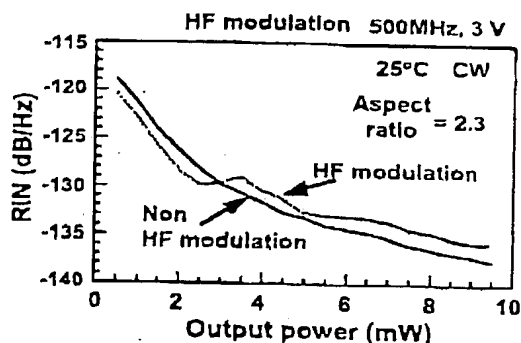


Fig.15 Relative intensity noise (RIN) characteristics

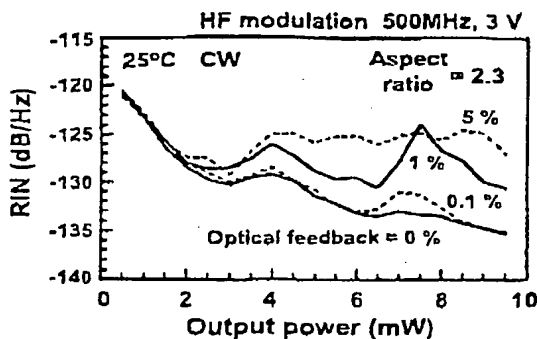


Fig.16 Optical feedback dependence of RIN characteristics

最後に、偏光比、ならびに、非点隔壁について触れる。Fig.17、Fig.18に示す様に、25°C、5mW、連続発振の条件下において、偏光比は100を超える値を示し、非点隔壁も1 μ m程度という極めて良好な値を示している。この値は、現在、DVD用光源として用いられている赤色レーザと、ほぼ同等の値である。

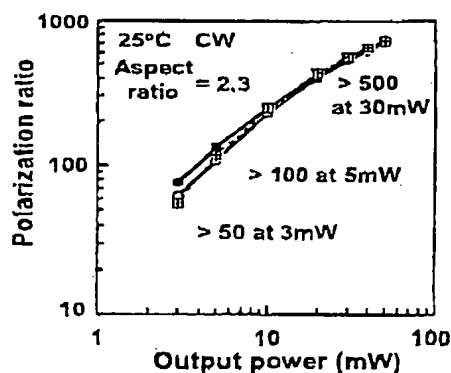


Fig.17 Power dependence of polarization ratio

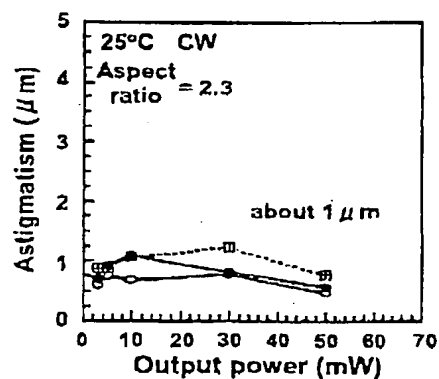


Fig.18 Power dependence of astigmatism

6. まとめ

今回、我々は、SiO₂/Si積層二層構造、ならびに、狭リッジストライプの採用により、100mW以上のキンクレベルと、9.0°以上の水平放射角の両立に成功し、さらに、新規縦構造を採用することで、低閾値電流と小垂直放射角の両立に成功した。

その結果、高温(80°C)連続動作時においても、100mWキンクフリーとアスペクト比2.3を両立する青紫色半導体レーザ素子を実現できた。

また、本レーザ素子は、100mWキンクフリー、低アスペクト比だけでなく、良好なノイズ特性、偏光比、非点隔壁も併せ持っている。したがって、次世代光ディスク用光源に好適な青紫色半導体レーザ素子が、既に現実のものになったことが示された。

参考文献

- [1] 浅野 竹春 他
第62回応用物理学会学術講演会 講演予稿集
14p-N-(2001)p298
- [2] M.Takeya et al.
Journal of Crystal Growth, 221(2000)646-651
- [3] T.Tejiyo et al.
CLEO 2001 Technical Digest p83
- [4] 後藤 修 他
第48回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集
28p-E-12(2001)p369
- [5] S.Nakamura et al.
Jpn. J. Appl. Phys. 35, L74(1996)